

РОЛЬ ЭФФЕКТА РОССИТЕРА—МАКЛАФЛИНА В ИЗУЧЕНИИ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Г. Н. Дремова

Российский федеральный ядерный центр

Большинство звезд для нас являются точечными источниками излучения. Это ставит проблему исследования звездных поверхностей, что подталкивает к развитию методов доплеровского картирования, поляриметрии, томографии, интерферометрии. Для их тестирования подходят только самые близкие звезды, тогда как затменные переменные звезды весьма благоприятны для достижения высокого пространственного разрешения при условии, что их орбита лежит на луче зрения. Фотометрический и спектроскопический анализ затмений позволяет определить геометрические и физические параметры звезд, а также наклоны звездных экваторов компонентов к плоскости орбиты. Оценку наклона дает измерение эффекта Росситера—Маклафлина, о котором рассказывается в лекции.

THE ROLE OF ROSSITER—MCLAUGHLIN EFFECT IN STUDY OF THE CLOSE BINARIES

G. N. Dryomova

Russian Federal Nuclear Centre

Most of the stars are point sources for us. This raises the problem of studying stellar surfaces, which pushes us to ward the development of Doppler mapping, polarimetry, tomography, optical and infrared interferometry. To test these methods, only nearby stars are suitable, while eclipsing binaries are useful to obtain high spatial resolution. Photometric and spectroscopic analysis of eclipses allows determining geometric and physical parameters of stars, as well as inclinations of stellar equators to orbital plane. Estimations of inclinations can be obtained from the measurement of Rossiter—McLaughlin effect, which will be discussed in the lecture.

ТДЗ: самые перспективные объекты в астрофизике

История изучения двойных звезд доказывает, что это самые перспективные объекты с момента изобретения телескопа. Первый замечательный фактор в их пользу — распространенность двойных звезд, составляющих более половины от всех звезд Галактики. Второй фактор — двойственность компонентов. В сочетании с благоприятной для наблюдения затмений их пространственной конфигурацией двойственность оказалась той «обратной связью», которая необходима для успешного построения теоретических моделей и их тестирования.

Периодический характер изменения блеска вследствие затмений компонентов друг другом, впервые правильно проинтерпретированный в 1783 г. английским астрономом Джоном Гудрайком для β Per, впоследствии позволил «геометризовать» фотометрические наблюдения и определить относительные радиусы компонентов в долях большой полуоси орбиты, а также определить орбитальный период двойной системы. Но уже через сто лет, в конце XIX в., когда началось массовое спектральное изучение звезд, благодаря эффекту Доплера свершилась настоящая революция: по квантам «спрятанного» света можно было «взвесить» звездные компоненты двойной системы, а также определить их абсолютные радиусы и абсолютный размер орбиты.

Такое дистанцированное изучение возможно при условии, что двойная система является одновременно и спектрально-двойной, и затменно-переменной, что характерно для класса тесных двойных звезд (ТДЗ), в которых расстояние между компонентами соизмеримо с их радиусами. В ТДЗ с ненулевым эксцентриситетом звездные компоненты постоянно испытывают взаимную приливно-вращательную деформацию, вследствие чего большая полуось орбиты начинает вращаться относительно центра масс в том же направлении, что и компоненты по орбите. Это явление известно как «классический» апсидальный эффект, обеспечивающий наблюдательный тест теории внутреннего строения звезд, поскольку скорость вращения большой полуоси (линии апсид) оказывается пропорциональной распределению плотности звезды по радиусу. Но в отсутствие приливно-вращательной деформации компонентов двойной системы их большая полуось все равно испытывала бы вращение вследствие искривления пространства, обнаруживая, таким образом, «релятивист-

ский» апсидальный эффект. Возможность регистрации апсидального эффекта позволяет провести качественные тесты теории внутреннего строения, включая аспекты согласования возрастов и химического состава компонентов, а также корректировки темпов химических реакций для согласованного описания химической эволюции звезд и Галактики.

Задача определения возраста представляет собой фундаментальную проблему в астрофизике, отражающей ряд космологических аспектов. Во-первых, знание возраста позволяет перейти к начальным распределениям, например, построить начальную функцию масс (НФМ), в которой чередование максимумов и минимумов коррелирует с эпохами звездообразования. Во-вторых, знание возраста дает возможность искать эволюционные связи между ТДЗ разных классов, что в подходе популяционного синтеза (объединение звезд разных классов в одну эволюционную последовательность) обеспечивает тест разнообразию конечных стадий эволюции, успевающих реализоваться за Хаббловское время.

Разнообразие конечных эволюционных стадий в ТДЗ обусловлено тривиальным обстоятельством — изменением массы компонентов в ходе их эволюции. Хорошо известный *парадокс Алголя*, который был разрешен американским астрофизиком Кроуфордом введением процесса «перемены ролей компонентов» вследствие обмена массой между ними, стал серьезным тестом теории звездной эволюции в 60-е гг. XX в.

ТДЗ оказались настолько уникальными физическими лабораториями, что позволили тестировать космологические теории, включая релятивистские эффекты ОТО. Настоящим триумфом изучения ТДЗ стало прямое детектирование гравитационных волн [1], сгенерированных в результате слияния двух черных дыр звездной массы. Если в начале истории своего открытия ТДЗ приоткрыли завесу тайны звездных размеров, то сейчас они почти «подобрались» к космологической сингулярности, многократно «копируемой» в процессах слияния двойных черных дыр.

Базовые каталоги ТДС: проблема апсидального движения

Если вернуться к статистике, число затменно-переменных звезд, для которых известны приближенные значения их физических и абсолютных параметров орбиты, в нашей Галактике не превышает

5 000. Речь идет о ТДЗ из каталога «Приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд», составленного М. А. Свечниковым и Э. Ф. Кузнецовой [2] по результатам простых классификационных критериев [3], примененных к данным ОКПЗ III [4].

Эти простые критерии, отражающие степень заполнения полостей Роша и положение компонент на эволюционной диаграмме Герцшпрунга—Рессела, были найдены в результате долгого рутинного труда по сбору и систематизации данных наблюдений затменных переменных звезд, составивших базу карточного каталога Свечникова. Идея простоты классификационных критериев состояла в их применении к общедоступным данным наблюдений, содержащихся в каталогах с большими объемами данных. Эти критерии составлены из комбинации базовых наблюдательных данных транзитной фотометрии: орбитального периода P ТДЗ, глубины главного затмения A_1 , разности глубин минимумов ΔA и спектрального класса главного компонента Sp_1 .

Чуть более 2 % от данных каталога М. А. Свечникова и Э. Ф. Кузнецовой составляет класс спектрально-двойных звезд с хорошо изученными абсолютными элементами орбиты (112 систем). Речь идет о другом известном каталоге М. А. Свечникова и Е. Л. Перевозкиной [5] — «Каталоге орбитальных элементов, масс и светимостей звезд главной последовательности с разделенными компонентами», отражающем уровень астрометрических измерений XX в., когда подавляющее большинство систем открывались массовым фотографическим способом.

Каталог М. А. Свечникова и Е. Л. Перевозкиной позволяет комплексно тестировать теоретические эволюционные модельные треки звезд, а также проверить надежность своих вычислений по результатам сравнения с данными нового каталога ТДЗ. Это каталог «Точные массы и радиусы нормальных звезд: современные результаты и применения», составленный в 2010 г. Торресом, Андерсеном и Гименесом [6] по данным современных космических миссий. Продолжая выстраивать статистику хорошо изученных звезд, нужно сказать, что только треть от ТДЗ с известными фотометрическими и спектроскопическими данными наблюдений демонстрирует апсидальное движение, количественная оценка которого может быть воспроизведена в рамках динамической теории апсидального движения, объединенной с анализом неадиабатических приливных осцилляций, а также механизмов затухания ответных осцилляций звезды.

Уникальное свойство апсидального движения — одновременно характеризовать темп поворота эллиптической орбиты ТДЗ и распределение плотности внутри каждого компонента — позволяет использовать константы внутреннего строения $k_{2,1}$ и $k_{2,2}$, рассчитываемых для компонентов ТДЗ по модельным эволюционным звездным трекам Кларэ [7] в качестве параметров разложения апсидального движения.

Вычислительная процедура оперирует набором констант, характеризующих распределение плотности $\rho(r)$. Этими константами для каждой компоненты ТДС являются глубина конвективной оболочки x_{bf} , радиус гирации β , характеристика политропной структуры конвективной оболочки E , константы второго порядка, характеризующие тормозные моменты вследствие лучистого затухания E_2 и вследствие турбулентной вязкости в конвективных средах, λ_2 , соответственно, а также параметры апсидального движения второго порядка $k_{2,1}$ и $k_{2,2}$ для главного и вторичного компонентов соответственно.

Именно второй порядок указанных констант дает максимальный вклад в апсидальное движение и создание тормозных моментов. Это обстоятельство позволяет упростить теоретические выкладки динамической теории апсидального движения [8–13]. Например, соотношение для оценки периода апсидального движения приобретает простой вид:

$$\frac{P}{U_{cl}} = c_1 \cdot k_{2,1} + c_2 \cdot k_{2,2}, \quad (1)$$

где P — аномалистический орбитальный период; U_{cl} — период вращения линии апсид из-за вращательно-приливной деформации. Коэффициенты c_1 и c_2 — константы известных из спектроскопических и фотометрических наблюдений физических характеристик и элементов орбиты:

$$c_i = \left(\frac{R_i}{A}\right)^5 \cdot \left\{ 15f(e) \frac{M_{3-i}}{M_i} + \left(\frac{w_{ax,i}}{w_{orb}}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{M_{3-i}}{M_i}\right) g(e) \right\}, \quad (2)$$

$$f(e) = \left(1 + \frac{3}{2} \cdot e^2 + \frac{1}{8} \cdot e^4\right) \cdot (1 - e^2)^{-5}, \quad (3)$$

$$g(e) = (1 - e^2)^{-2}, \quad (4)$$

где i — номер компонента; M — масса; R — радиус; $w_{ax,i}$ — угловые скорости осевого вращения компонентов; w_{orb} — средняя угловая скорость орбитального обращения; e — эксцентриситет; A —

большая полуось орбиты. M , R , A даны в солнечных единицах, угловые скорости — в градусах за секунду. Эти формулы справедливы в предположении, что векторы осевого и орбитального вращения звезд параллельны.

Известно, что апсидальное движение в эксцентричных ТДЗ происходит не только вследствие вращения компонентов и взаимного влияния неоднородного гравитационного поля компаньона. Также имеет место релятивистский эффект апсидального движения, порождаемый искривлением пространства и не связанный с конечными размерами звезд. В рамках ОТО релятивистский эффект апсидального движения определяется согласно [14]:

$$\frac{P}{U_{rel}} = 6.37 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{M_1 + M_2}{A \cdot (1 - e^2)} \quad (5)$$

и суммируется к классическому эффекту в случае ТДЗ (тройственность системы усложняет характер учета релятивистской поправки):

$$U_A^{-1} = U_{cl}^{-1} + U_{rel}^{-1}. \quad (6)$$

Сравнение теоретически оцененного U_A и полученного из наблюдений U_{obs} периода апсидального движения для эксцентричной ТДЗ является важным тестом для теоретических эволюционных моделей в вопросе о правильности выбранного распределения плотности компонентов $\rho(r)$. О правомерности такого подхода могут сказать результаты сравнения наблюдаемого U_{obs} и теоретического U_A значений апсидального периода [15], которые в большинстве случаев показывают хорошее согласие, что подтверждает надежность используемых эволюционных моделей Кларэ.

Для нескольких систем (*AS Cam*, *NY Cep*, *V1765 Cyg*, *AI Hya*, *DI Her*, *EW Ori*) отмечалось все же заметное рассогласование наблюдаемого и теоретического значений апсидального периода, которое стало известным как «релятивистский парадокс», поскольку замечен он был в ТДЗ с большим релятивистским вкладом ($\sim 80\%$) в апсидальное движение. Проблема рассогласования подтолкнула к поиску альтернативных ОТО теорий (несимметричная теория гравитации), обеспечивающих «нужное» изменение темпа поворота орбиты для каждой из ТДЗ в отдельности. Таких страниц можно найти немало в истории ОТО — теории, которая уже сто лет выдерживает испытания временем и космическими экспериментами.

Сегодня не стоит больше проблема рассогласования наблюдаемого и теоретического значений периода апсидального движения.

Во-первых, найдено несколько систем с почти 100 % вкладом релятивистского эффекта в апсидальное движение (*GG Ori*, *V541 Cas*, *V1143 Cyg*, *V1147 Cyg*), которые не показывают рассогласования данных наблюдений и теории. Значит, дело не в ОТО. Во-вторых, благодаря другому важному эффекту, позволяющему в затменных переменных системах измерять аномалию кривой лучевой скорости, были получены доказательства о неколлинеарности осевого и орбитального моментов компонентов двойной системы, тогда как базовый формализм теории апсидального движения применялся в предположении о параллельности осей в ТДЗ. Рассмотрим этот эффект подробнее в следующем разделе.

Эффект Росситера—Маклафлина

Как известно, линии поглощения в спектре вращающейся звезды уширяются из-за доплеровского сдвига, когда свет, излучаемый приближающейся к нам полусферой звездной поверхности, сдвигается в синюю часть спектра, а свет, излучаемый удаляющейся от нас звездной поверхности, — в красную часть спектра. Во время затмений и прохождений компонентов ТДЗ сегменты их полусфер постепенно экранируются, ослабляя попеременно соответствующую компоненту скорости линии поглощения. В результате профили линий спектра искажаются (рис. 1), что позволяет выявить проекцию скорости вращения звезды и оценить угол между орбитальной плоскостью и экватором затмеваемой звезды.

Идея использовать спектроскопические наблюдения затмений в ТДЗ для расшифровки звездного вращения принадлежит Хольцу [16], который еще в 1893 г. понял, что для анализа скорости собственного вращения звезды важна аномалия спектральной линии, а не ее уширение. Ведь уширение линий в спектре может быть вызвано и рядом других причин: давлением, вариацией фотосферной конвекции от центра диска к краю, поверхностными полями скоростей и т. д. Первые уверенные измерения были получены в 1924 г. независимо двумя астрономами — Росситером для β Лиры и Маклаfliном для Алголя, которые сообщили об изменении первого момента линии поглощения [17, 18]. Вот это изменение формы линии поглощения и получило название *эффекта Росситера—Маклаfliна*. Дальнейшие аспекты этой теории были наработаны Хосокавой [19], Копалом [11] и др. Возможность моделирования спектрального искажения линий выявляет не только проекции скорости вращения звезды, но и угол

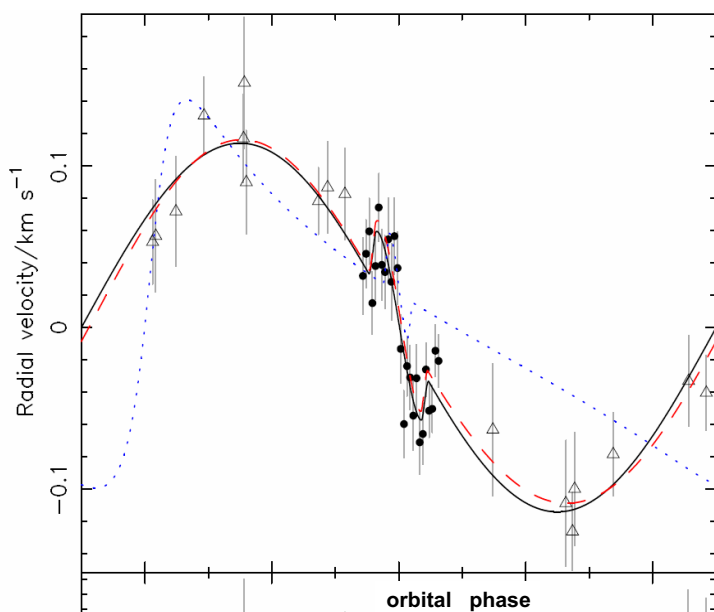


Рис. 1. Диаграмма лучевой скорости, иллюстрирующая искажение линии поглощения для WASP-78

между плоскостью орбиты и экваториальной плоскостью затмеваемой звезды.

За более чем 90-летнюю историю с момента открытия эффекта Росситера—Маклафлина всего несколько затменно-переменных звезд «удостоились» количественно выполненного анализа этого эффекта ввиду очевидной сложности измерений. Возможно, ситуация такой бы и оставалась, если бы не массовые открытия экзопланет, которые бурно начались в 90-е гг. XX в. и бросили вызов теории образования планет. Современные теории, учитывающие миграционные процессы планет-гигантов, могли быть проверены с помощью эффекта Росситера—Маклафлина на предмет сохранения или нарушения коллинеарности осей собственного вращения планет и их орбитального обращения вокруг родительской звезды.

Резонанс вокруг этой темы заставил задуматься о «релятивистском парадоксе» в апсидальном движении эксцентричных ТДЗ. Почему для некоторых систем наблюдаемый апсидальный период мо-

жет в несколько раз отличаться от его теоретического значения? Наиболее очевидная причина заключалась как раз в том, что теоретические оценки классического апсидального периода выводятся в молчаливом предположении о параллельности орбитальной оси и осей вращения компонентов. Вот отсюда и надо начать все сначала — по измеренному эффекту Росситера—Маклафлина оценить реальную пространственную конфигурацию затменно-переменной системы.

Затменные переменные с проблемным апсидальным периодом

Первой ТДЗ с наблюдаемым апсидальным периодом, в пять раз превышающим свою теоретическую оценку, для которой был измерен эффект Росситера—Маклафлина, стала *DI Her*. Заметим, что в этой системе вклад релятивистского эффекта в апсидальное движение составляет 56 %. Анализ формы искажения спектральных линий поглощения позволил установить, что в системе *DI Her* оси вращения звездных компонентов высоко наклонены к орбитальной оси [20]. Еще в 1985 г. Шакура [21] численно показал, что приведение в согласованность наблюдаемого темпа апсидального движения с теоретическим потребует почти перпендикулярной ориентации осей вращения компонентов орбитальной оси (87°). Эта система, которая в течение нескольких десятилетий подталкивала к проверке теории внутреннего строения и ОТО, так как наблюдательный темп апсидального периода ($\sim 34\,600$ лет) в пять раз отставал от теоретически предсказанного ($\sim 8\,630$ лет), сегодня показывает различие теории и наблюдения в пределах 10 % ошибки: $U_A \sim 22\,620$ лет и $U_{obs} \sim 24\,775$ лет [22].

Орбитальные и физические параметры ТДЗ из [15]

ТДЗ	M_1, M_\odot M_2, M_\odot	R_1, R_\odot R_2, R_\odot	P^d A, R_\odot	e	$\lg k_{2,1}$ $\lg k_{2,2}$	U_{obs} лет	U_A лет
AS Cam	3.3	2.55	3.4309714	0.164	-2.3215	2 400	870
	2.5	1.95	17.19		-2.3148		
DI Her	5.16	2.72	10.550185	0.489	-2.1063	34 600	8 630
	4.53	2.47	43.14		-2.1063		

Другая хорошо известная система с проблемным апсидальным периодом — *AS Cam* [23]. Как и в случае с *DI Her*, ее наблюдае-

мый апсидальный период заметно превышает теоретически предсказанный: $U_A \sim 870$ лет и $U_{obs} \sim 2\,250$ лет. Спектроскопическое изучение этой системы позволило найти проекции вращательных скоростей звездных компонентов, которые оказались очень малы (14.5 и 4.6 км/с [24]), что уже можно рассматривать как косвенное свидетельство неколлинеарности экваториальных и орбитальной осей.

Чтобы убедиться в этом, мы провели расчеты для затменно-переменных систем *DI Her* и *AS Cam* (см. таблицу) с учетом разориентированности всех осей: угол наклона оси вращения спутника к орбитальной плоскости менялся с шагом 1° (кружки вдоль расчетной кривой) при фиксированном угле наклона оси вращения главного компонента к орбитальной плоскости. Угол наклона главного компонента пробегал значения от 0 до 90° с шагом 10° (семейство кривых).

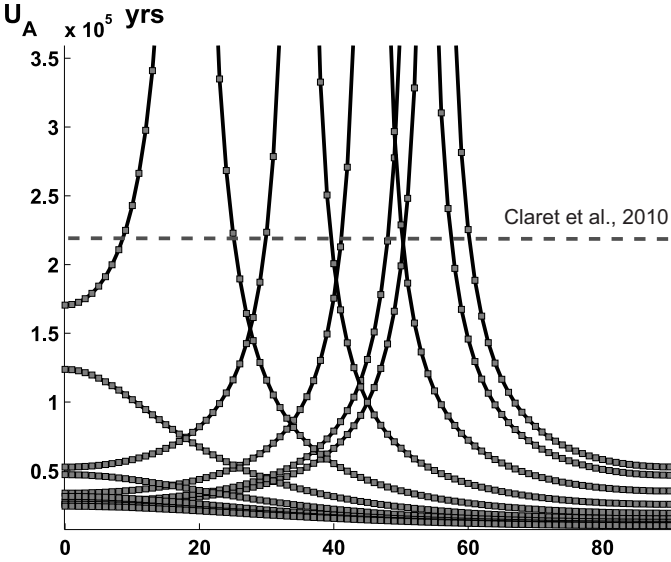


Рис. 2. Зависимость апсидального периода от угла наклона оси вращения звезды к орбитальной оси обращения для *DI Her*. По оси ординат — теоретическая оценка апсидального периода с учетом классического и релятивистского вкладов, а по оси абсцисс — угол λ , который измеряется в эффекте Росситера—Маклафлина

Результаты расчетов для системы *DI Her* приведены на рис. 2, который показывает, что согласование наблюдаемого и теоретически предсказанного апсидального периода достигается при любом наклонении экваторов звездных компонентов по отношению к орбитальной плоскости, включая и коллинеарный случай, но при условии ретроградного движения от вклада вращательной компоненты.

Для *AS Cam* (рис. 3) ситуация аналогичная, с той лишь разницей, что решение для *DI Her* найдено для проекционных углов осей собственного вращения звездных компонентов к картинной плоскости $i_1 = i_2 = 15^\circ$, а для *AS Cam* решение получено для $i_1 = i_2 = 8^\circ$. Безусловно, необходимо прямое измерение эффекта Росситера—Маклафлина для этой системы, а также продолжение наблюдений с целью уточнения элементов орбиты и физических параметров.

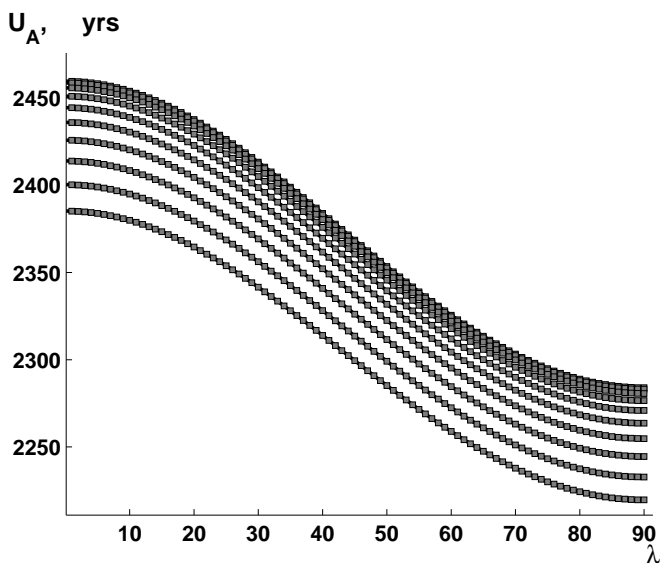


Рис. 3. Зависимость апсидального периода от угла наклона оси вращения звезды к орбитальной оси обращения для *AS Cam*

Заключение

В обозримом будущем измерение эффекта Росситера—Маклафлина станет массовым для затменно-переменных звезд, но уже сейчас, преодолевая трудности новых технологий «распутывания спектров», на свет появляются альтернативные методы измерения наклонений, которые не уступают по точности, не требуя при этом условия транзитных событий. Речь идет о возможности использования звездных пятен медленно вращающихся звезд как трассеров звездного наклонения, а также применения высокоточной фотометрии для быстровращающихся звезд с большим коэффициентом гравитационного потемнения, позволяющей оценить спроецированное наклонение.

Библиографические ссылки

1. *Abbott B. P., 966 coauthors.* The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2016. — Vol. 227. — P. 11.
2. *Свечников М. А., Кузнецова Э. Ф.* Каталог приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд. — Свердловск : Изд-во Урал. ун-та, 1990.
3. *Свечников М. А., Истомин Л. Ф., Грехова О. А.* Разработка и применение простых критериев для массовой классификации затменных переменных звезд // *Переменные звезды.* — 1980. — Т. 21. — С. 413—443.
4. *Холопов П. Н.* Общий каталог переменных звезд.— 4-е изд. — М. : Наука, 1985.
5. *Свечников М. А., Перевозкина Е. Л.* Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей звезд типа РГП. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 1999. — С. 1—5.
6. *Torres G., Andersen J., Gimenez A.* Accurate masses and radii of normal stars: Modern results and applications // *Astron. Astrophys. Rev.* — 2010. — Vol. 18. — P. 56.
7. *Claret A.* New grids of stellar models including tidal-evolution constants up to carbon burning. I. From 0.8 to 125 M at $Z = 0.02$ // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 919. — P. 919—925.
8. *Russell H. N.* On the advance of periastron in eclipsing binaries // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1928. — Vol. 88. — P. 641—643.

9. *Sterne T. E.* Apsidal motion in binary stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1939. — Vol. 99. — P. 451–462.
10. *Cowling T. G.* On the motion of the apsidal line in close binary systems // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1938. — Vol. 98. — P. 734–743.
11. *Kopal Z.* Close binary systems. — L. : Chapman and Hall, 1959. — P. 497.
12. *Kopal Z.* Dynamics of Close binary systems. — Dordrecht, Holland, Reidel, 1978. — P. 524.
13. *Martynov D. Y., Khaliullin Kh. F.* On the relativistic motion of the periastron in the eclipsing binary system DI Herculis // Astrophys. Space. Sci. — 1980. — Vol. 71. — P. 147–170.
14. *Moffat J. W.* The orbital motion of DI Herculis as a test of a theory of gravitation // Astrophys. J.— Pt. 2.— Letters to the Editor. — 1984. — Vol. 287. — P. 77–79.
15. *Dryomova G. N., Svechnikov M. A.* Calculation of Tidal Evolution Constants for Close Binary Systems // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2011. — Vol. 27. — P. 62–78.
16. *Holt J. R.* Spectroscopic Determination of Stellar Rotation // Astronomy and Astro-Physics (The Sidereal Messenger). — 1893. — Vol. 12. — P. 646.
17. *Rossiter R. A.* On the detection of an effect of rotation during eclipse in the velocity of the brigher component of beta Lyrae, and on the constancy of velocity of this system // Astrophys. J. — 1924. — Vol. 60. — P. 15–21.
18. *McLaughlin D. B.* Some results of a spectrographic study of the Algol system // Astrophys. J. — 1924. — Vol. 60. — P. 22–31.
19. *Hosokawa Y.* On the Rotation Effect of Velocity Curves in Eclipsing Binary Systems // Publication of Astronomical Society Japan. — 1953. — Vol. 5. — P. 89–95.
20. *Albrecht S., Reffert S., Snellen I. A. G., Winn J. N.* Misaligned spin and orbital axes cause the anomalous precession of DI Herculis // Nature. — 2009. — Vol. 461. — P. 373–376.
21. *Shakura N. I.* On the Apsidal Motion in Binary Stars // Письма в Астрон. журн. — 1985. — Vol. 11. — P. 536–541.
22. *Claret A., Torres G., Wolf M.* DI Herculis as a test of internal stellar structure and general relativity. New apsidal motion rate and evolutionary models // Astron. Astrophys. — 2010. — Vol. 515. — P. 1–6.
23. *Khaliullin Kh. F., Kozyreva V. S.* Apsidal motion in the eclipsing binary AS Cam // Astrophys. Space. Sci. — 1984. — Vol. 94. — P. 115–122.
24. *Pavlovski K., Southworth J., Kolbas V.* Apsidal motion of the eclipsing binary AS Camelopardalis: discrepancy resolved // Astrophys. J. Lett. — 2011. — Vol. 734. — P. 29–34.